

# 冻融作用下PP纤维 - 粉煤灰改良黄土抗剪强度 试验研究

李宇航, 张浩宇, 汪佳欣, 张海山, 陈树峰\*

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2023年12月18日; 录用日期: 2024年1月16日; 发布日期: 2024年1月25日

## 摘要

通过制备重塑PP纤维 - 粉煤灰改良黄土试样进行室内直剪试验, 探究冻融循环与含水率对改良黄土抗剪强度的影响, 并建立改良黄土抗剪强度预估模型。实验结果表明: 随着冻融循环次数和含水量增加, 改良黄土黏聚力和内摩擦角均呈降低的趋势; 冻融循环3次后, 黄土内部新的平衡、强度趋于稳定, 其中黏聚力降低约47%; 随着含水率由13%增至25%, 黏聚力降幅达40%, 内摩擦角降幅相对较小。基于此, 建立考虑冻融循环与含水率影响的PP纤维 - 粉煤灰改良黄土抗剪强度参数预测模型, 为季冻区改良黄土路基工程设计提供参考。

## 关键词

黄土, 抗剪强度, 粉煤灰, PP纤维, 冻融循环, 含水量

# The Shear Strength Characteristics of PP Fiber-Fly Ash Modified Loess under Freeze-Thaw Cycles

Yuhang Li, Haoyu Zhang, Jiaxin Wang, Haishan Zhang, Shufeng Chen\*

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Dec. 18<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jan. 16<sup>th</sup>, 2024; published: Jan. 25<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

A direct shear test was carried out to study the influence of freeze-thaw cycle and moisture con-

\*通讯作者。

文章引用: 李宇航, 张浩宇, 汪佳欣, 张海山, 陈树峰. 冻融作用下 PP 纤维-粉煤灰改良黄土抗剪强度试验研究[J]. 土木工程, 2024, 13(1): 36-42. DOI: 10.12677/hjce.2024.131006

tent on the shear strength of modified loess by preparing the samples of remodeled PP fiber-fly ash, and to establish a prediction model for the shear strength of improved loess. The experimental results show that the cohesion and internal friction angle of improved loess decrease with the increase of freeze-thaw cycles and water content. After three freeze-thaw cycles, the new equilibrium and strength of the loess become stable, and the cohesion decreases by about 47%. With the moisture content increased from 13% to 25%, the cohesion decreased by 40%, and the internal friction angle decreased relatively little. Based on this, a prediction model of the shear strength parameters of PP fiber-fly ash improved loess was established considering the influence of the freeze-thaw cycle and water content, which could provide a reference for the design of roadbed engineering of improved loess in seasonal freezing areas.

## Keywords

Loess, Shear Strength, Fly Ash, PP Fiber, Freeze-Thaw Cycles, Water Content

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

黄土在我国西北地区分布广泛,常作为主要的填筑材料应用于路基中[1] [2]。冻融循环作用和水分的迁移作用易使黄土微结构发生破坏和改变,造成其力学性质劣化,引发一系列工程病害[3] [4] [5]。因此,探究不同冻融循环次数、含水量下黄土的力学特性,对于黄土路基工程设计和病害防治具有重要意义。

近年来,我国灰渣排放量现已达到1.2亿吨每年,粉煤灰的再利用可有效减少污染和场地使用问题[6]。研究人员发现粉煤灰能应用于加固黄土路基工程[7] [8]。李志清等[9]研究发现,粉煤灰与黄土在一定含水量与压实度条件下,形成致密的混合结构,使改良黄土强度大大提高。PP纤维具有强度高、耐化学侵蚀和优越的抗冻性等[10]优点。张笑峰等[11]采用正交试验设计获得了纤维掺量与纤维长度的最佳配合比参考值,并发现改良粉土中掺入纤维,不仅其脆性得到改善,抗剪强度也得到提高。因此,优越的性能、固废利用率使粉煤灰和PP纤维成为岩土工程领域中具有吸引力的材料。

冻融循环作用下,西北季冻区岩土体抗剪强度等力学性能易发生劣化[12]。目前,众多学者针对冻融循环影响黄土力学性质的变化规律做了大量研究工作。孙杰龙等[13]研究发现高填方黄土黏聚力随冻融循环次数的增加而逐渐减小,且在冻融作用下含水率越大,黏聚力劣化幅值和速率越大。吕倩俐等[14]发现冻融循环作用下,伊犁黄土黏聚力呈先减小后增大的趋势,而内摩擦角则先增大后减小。

综上所述,目前黄土抗剪强度在冻融循环、含水率影响下开展大量研究,但针对在冻融循环、含水率作用下PP纤维-粉煤灰改良黄土抗剪强度的研究较少。鉴于此,本文通过制备重塑PP纤维-粉煤灰改良黄土试样开展室内直剪试验,探究冻融循环与含水率对改良黄土黏聚力和内摩擦角的变化规律,并建立改良黄土抗剪强度预估模型。研究成果有助于完善寒区黄土改良机理,为路基工程实践提供依据。

## 2. 试验准备和方法

### 2.1. 试验材料

黄土位于陕西省西安市长安区路基土。取样深度约为1 m~2 m之间,土体呈黄褐色,质地较为均匀,在场内连续分布。实验前将散状黄土风干碾碎后过0.5 mm筛,置于105℃的烘箱中烘干24 h密封备用。

根据《公路土工试验规程(JTG 3430-2020)》，可得黄土基本物理指标如表 1 所示。粉煤灰取自山西某热电厂的一级粉煤灰，含水率为 2.8%，干密度为 0.82 g/cm<sup>3</sup>，相对质量密度 2.02。试验聚丙烯纤维由山东皓隆建材工程有限公司生产，其基本物理力学参数如表 2 所示，表现出强拉伸、高弹性、良好抗温性等优点。

Table 1. Basic physical indicators of loess

表 1. 黄土基本物理指标

比重 $G_s$	天然含水量 $w/\%$	最大干密度 $\rho/(g/cm^3)$	孔隙比 $e$	塑限 $W_p/\%$	液限 $W_L/\%$	塑性指数 $I_p$
2.7	19	1.64	0.63	20.6	34.2	13.6

Table 2. Physical and mechanical property parameters of polypropylene fiber

表 2. 聚丙烯纤维的物理力学性能参数

纤维类型	长度 (mm)	直径 (mm)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	弹性模量 (GPa)	断裂伸长率 (%)	断裂抗拉强度 (MPa)
单纤维	12	0.048	0.91	4.8	15	486

## 2.2. 试样制备与测试方法

首先将散状黄土风干过筛(0.5 mm)处理，随后根据配合比称取一定质量的粉煤灰、PP 纤维和蒸馏水(误差不大于 0.01 g)，与之混合均匀。试验方案具体如表 3，其中粉煤灰含量、PP 纤维含量分别固定至 20% 和 0.5%，含水率设置 13%、16%、19%、22%、25% 五档。在金属环刀模具底部放上滤纸，然后将制备好的混合物依据最大干密度 1.64 g/cm<sup>3</sup> 到标准模具中(直径 61.8 mm，高 20 mm)。最后将成型的试样密封并静置在室内 7 天，温度恒定为 20.0 ± 2℃。而后，将土样放置在冻融试验箱中进行冻融循环，首先在 -20℃ 条件下冻结 12 小时，而后在 20℃ 的环境中融化 12 小时，并将此过程重复 0、1、2、3、5、7 和 10 次。直剪试验用仪器为 ZJ 型应变控制式直剪仪，应变速率控制在 0.8 mm/min。以试样产生 6 mm 剪切位移作为破坏标准。

Table 3. Direct shear test scheme

表 3. 直剪试验方案

粉煤灰含量/%	纤维含量/%	干密度/g/cm <sup>3</sup>	垂直应力/kPa	冻融循环/次	含水率/%
20%	0.5%	1.64	50, 100, 150, 200	0, 1, 2, 3, 5, 7, 10	13, 16, 19, 22, 25

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 冻融循环对抗剪强度的影响

图 1 为含水率一定时(19%)，冻融循环对改良黄土的黏聚力和内摩擦角的影响。随着冻融循环次数的增加，改良黄土黏聚力和内摩擦角均呈降低的趋势，在冻融循环 10 次时，黏聚力由 45.53 下降至 25.59 kPa，内摩擦角由下降至 26.4° 下降至 24.46°；其中黏聚力下降最为显著，累计降幅达 47%，且主要发生在前 3 次冻融循环中，而后黏聚力随着冻融循环基本不再变化。这是由于冻结过程中，土体内部水分发生冻胀，对黄土颗粒产生挤胀张拉作用，一定程度破坏了颗粒间胶结，在多次冻融循环下，改良黄土的结构性不断变弱，并最终稳定于一定程度。另一方面，土体内摩擦角在冻融循环影响下整体仍呈下降趋势，但降幅较低，仅为 7% 左右，其主要变化同样主要出现在前 3~5 次冻融循环作用下，之后有逐渐稳定的趋势。

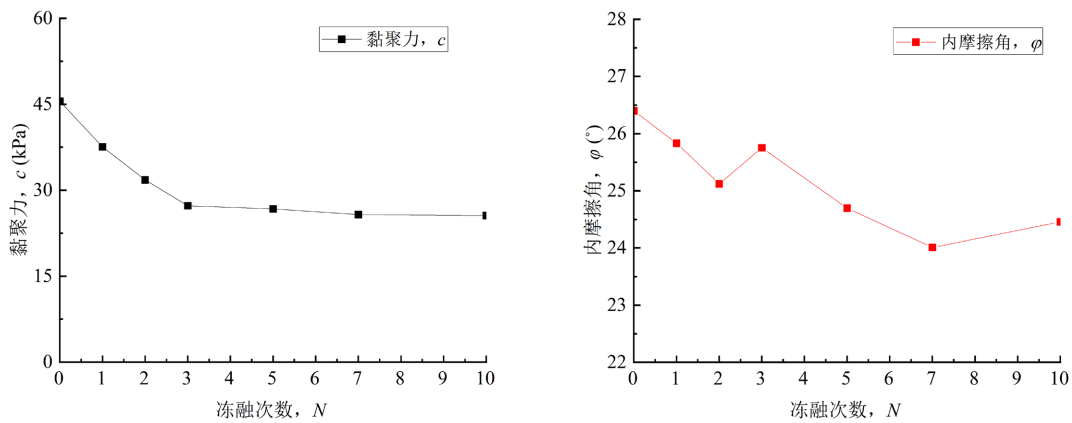


Figure 1. Effect of freezing and thawing times on shear strength parameters

图 1. 冻融次数对抗剪强度参数的影响

### 3.2. 含水量对抗剪强度的影响

图 2 为冻融循序一定时(5 次), 土样含水率对改良黄土的黏聚力和内摩擦角的影响。随着含水率的增加, 改良黄土的黏聚力和内摩擦角均呈降低的趋势, 相对于黏聚力, 对内摩擦角的影响不明显。当含水率由 13% 增至 25% 时, 黏聚力由 44.93 kPa 下降至 20.03 kPa, 内摩擦角由 26.78 $^{\circ}$  下降至 22.30 $^{\circ}$ ; 其中黏聚力累计降幅达 55%, 其变化幅度随着含水率的增长有逐渐减弱的趋势, 内摩擦角降幅约 17%, 其变化随含水率增长近乎呈线性关系。

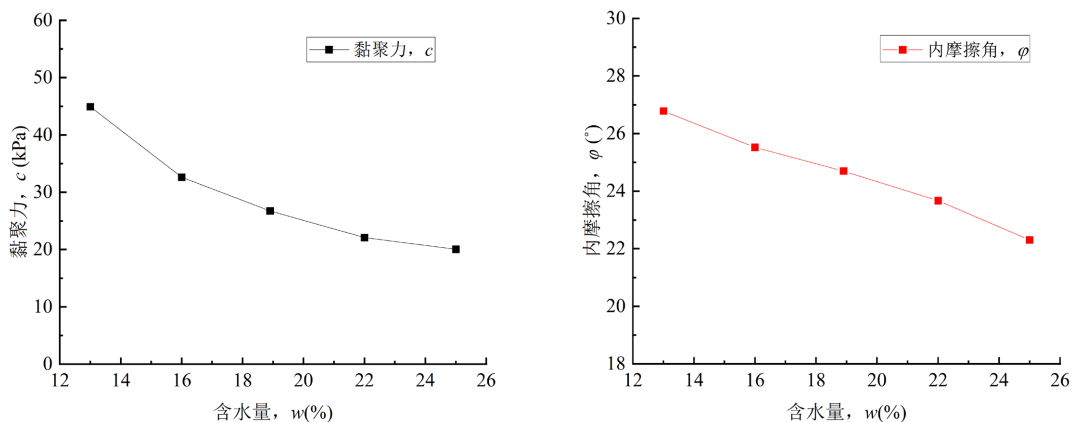


Figure 2. Effect of water content on shear strength parameters

图 2. 含水量对抗剪强度参数的影响

刘寒冰等[15]研究中指出这是由于含水率的变化改变了土体内部结构。当含水率小于 12.3% 左右时, 土的黏聚力和内摩擦角较大。但随着改良土含水率的增加, 颗粒间基质吸力随之降低, 土体变软, 土颗粒间的水膜联结作用减弱, 粒间胶结物质溶解, 导致黏聚力降低; 另一方面, 含水率增加使土颗粒结合水膜增厚, 自由水增多, 水膜的润滑作用明显, 导致粒间摩擦咬合作用降低, 进而引起内摩擦角的减弱。

## 4. 改良黄土抗剪强度定量化分析

基于上述试验结果, 图 3 建立考虑冻融循环次数( $N$ )和含水率( $w$ )的改良黄土黏聚力和内摩擦角量化分析模型。为了对数据进行归一化处理, 记冻融循环 5 次和含水率 19% 时的改良黄土黏聚力和内摩擦角

为黏聚力标准值  $\bar{c}$  和内摩擦角标准值  $\bar{\varphi}$ ，分别为 26.39 kPa 和 24.7°。采用指数函数拟合试验结果，获得黏聚力和内摩擦角与冻融循环次数的关系式，如下所示：

$$c = 20.54 \cdot e^{-0.59451N} + 25.32 = g_N(N) \cdot \bar{c} \quad (1)$$

$$\varphi = 2.337 \cdot e^{-0.23834N} + 24 = d_N(N) \cdot \bar{\varphi} \quad (2)$$

其中， $g_N(N)$ 和  $d_N(N)$ 表示冻融循环影响规律的归一化函数。

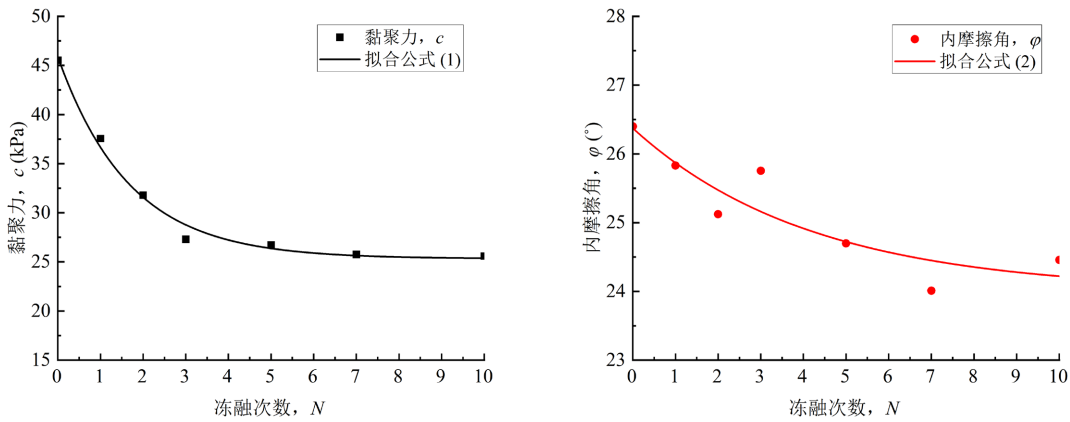


Figure 3. Fitting curve of freeze-thaw cycles and shear strength parameters  
图 3. 冻融次数与抗剪强度参数的拟合曲线

根据数据变化规律，图 4 分别采用指数函数和线性函数拟合试验结果，获得黏聚力和内摩擦角与含水率的关系式，如下所示：

$$c = 0.176 \cdot w^2 - 8.7 \cdot w + 127.83 = g_w(w) \cdot \bar{c} \quad (3)$$

$$\varphi = -0.3603 \cdot w + 31.43 = d_w(w) \cdot \bar{\varphi} \quad (4)$$

其中， $g_w(w)$ 和  $d_w(w)$ 含水率影响规律的归一化函数。

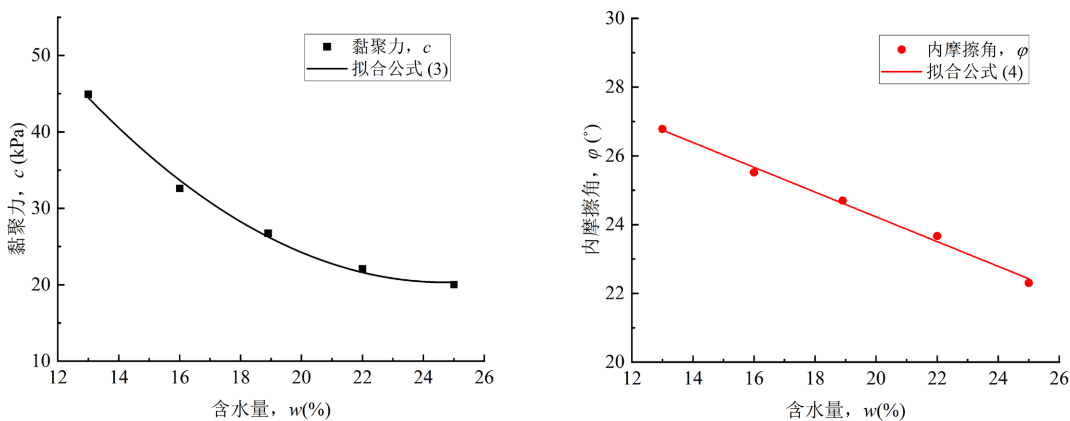


Figure 4. Fitting curve of water content and shear strength parameters  
图 4. 含水量与抗剪强度参数的拟合曲线

图 5 给出了黏聚力和内摩擦角的试验值与预测值的比较。拟合度分别为 0.989 和 0.884，拟合良好。

结果表明, 该预测模型可用于 PP 纤维 - 粉煤灰改良黄土的黏聚力和内摩擦角的估算。

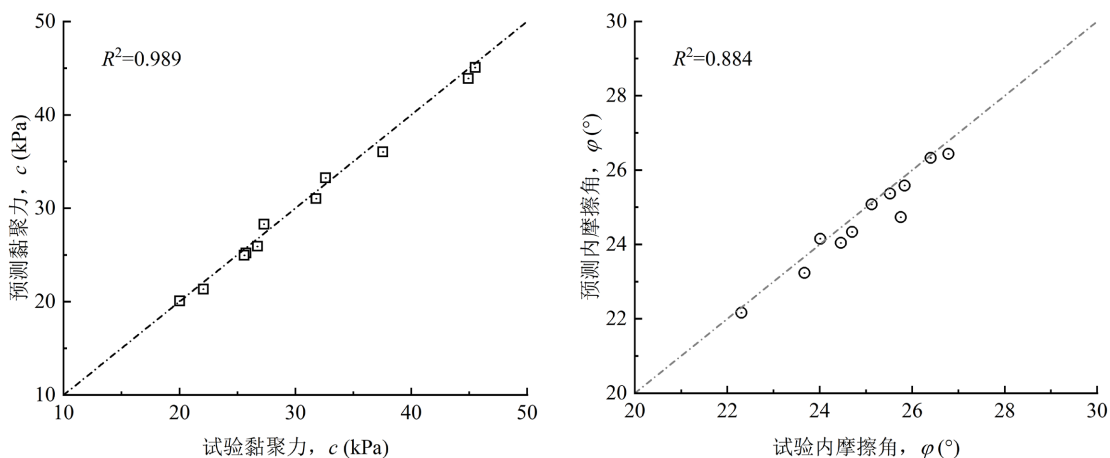


Figure 5. Comparison of the predicted results of modified loess with the experimental results

图 5. 改良黄土的预测结果与试验结果的对比如

## 5. 结论

针对 PP 纤维 - 粉煤灰改良黄土开展抗剪强度试验, 研究改良黄土(黏聚力和内摩擦角)随冻融循环与含水率的变化规律, 建立改良黄土抗剪强度参数预测模型, 为寒冷地区提供指导。最后, 将这些因素的影响纳入建立的模型中, 通过预测值与试验值比较, 确定了黏聚力和内摩擦角模型的准确性。从中可以得出以下主要结论:

1) 冻融循环和含水率对改良黄土的抗剪强度指标影响显著。其中黏聚力随着冻融次数的增加呈下降趋势, 并在经历 3 次冻融循环后基本趋于稳定。而内摩擦角呈上下波动起伏变化, 但整体上呈下降趋势。黏聚力和内摩擦角均随含水率的增加而大幅减小。

2) 冻融循环对改良黄土力学性质的影响机制为冻融循环引起的土颗粒不均匀收缩以及冻胀产生挤胀张拉作用, 使改良黄土的结构性变弱。而含水率变化则是由于土体颗粒间基质吸力降低, 土颗粒结合水膜增厚。

3) 考虑冻融次数与含水率的影响因素, 建立 PP 纤维 - 粉煤灰改良黄土的黏聚力和内摩擦角量化分析模型。结果表明, 预测结果与试验结果吻合较好, 验证了该模型的可靠性, 可供冻融环境下粉煤灰和 PP 纤维处理黄土的设计参考。

## 基金项目

大学生创新创业训练计划项目(X20221271501)。

## 参考文献

- [1] 詹良通, 焦卫国, 孔令刚, 等. 黄土作为西北地区填埋场覆盖层的可行性及设计厚度分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3362-3368.
- [2] 叶万军, 陈义乾, 张登峰, 等. 冻融作用下水分迁移对压实黄土强度影响的宏微观试验研究[J]. 中国公路学报, 2021, 34(6): 28-36.
- [3] 莫万远. 冻融循环对剑麻纤维加筋黄土抗剪强度性能的影响[J]. 铁道建筑技术, 2023(10): 70-74.
- [4] 刘宽, 叶万军, 景宏君, 等. 季冻区黄土微观损伤识别与宏观力学响应研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S1): 194-196.

- 
- [5] 董晓, 张爱军, 连江波, 等. 长期冻融循环引起黄土强度劣化的试验研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 888-892.
- [6] 冯海宁, 杨有海, 龚晓南, 等. 粉煤灰工程特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 579-582.
- [7] 孙延飞, 李双喜, 陆瑶, 等. 骨料碱活性检验及抑制碱骨料反应的试验研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34(3): 72-74+84.
- [8] 王成, 李桢怡, 葛广华, 等. 复合盐侵蚀-干湿耦合作用下聚丙烯纤维混凝土抗盐蚀性能试验研究[J]. 混凝土, 2023(4): 29-35+39.
- [9] 李志清, 余文龙, 范林峰, 等. 改良黄土强度特性与工程处置试验研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(1): 118-120.
- [10] 张源, 王宝民. 聚丙烯纤维增强混凝土的力学和耐久性能研究[J]. 江西建材, 2023(7): 35-37.
- [11] 张笑峰, 张艳美, 刘锦程, 等. 纤维与粉煤灰改良粉土的正交试验分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(1): 38-40.
- [12] 穆彦虎, 马巍, 牛富俊, 等. 多年冻土区道路工程病害类型及特征研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(3): 259-267.
- [13] 孙杰龙, 王弘起, 李盛斌, 等. 冻融作用下高填方黄土抗剪强度劣化特性分析[J]. 岩土工程技术, 2023, 37(5): 610-612.
- [14] 吕倩俐, 张艳阳, 张天栋, 等. 不同冻融循环次数及含水率条件下伊犁地区黄土力学强度损伤特性[J]. 工程地质学报, 2023, 31(4): 1270-1278.
- [15] 刘寒冰, 张互助, 王静, 等. 冻融及含水率对压实黏质土力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 158-164.